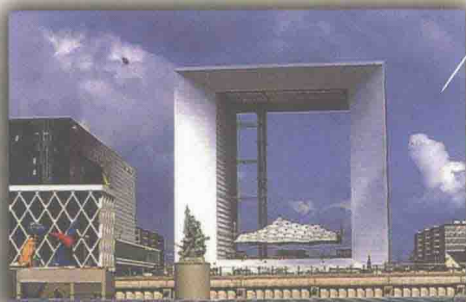


混凝土技術

修訂二版

土木營建工程用書

沈永年 王和源 編著
林仁益 郭文田



全華圖書股份有限公司 印行

(修訂版)

混凝土技術

沈永年.王和源.林仁益.郭文田 編著

 全華科技圖書股份有限公司 印行

序 言

Concrete

**— the worldwide structural material from the oldest
to the most smart technology.**

混凝土是世界上使用最多且最廣泛的土木營建材料，1920 年全世界混凝土年用量為 7 億噸，1997 年全世界混凝土年用量則增為 88 億噸，由於人口增加、經濟繁榮與都市化建設之需求，2000 年全世界混凝土年用量已超過 120 億噸。混凝土也是一種很特殊的複合材料，係由水泥、水、粗細骨材、摻料等四種以上性質完全不同的材料所組成。理論上，混凝土最好能夠符合使用者、設計者、施工者的需求，但事實上往往是相互矛盾的。譬如在強度方面，設計者會要求降低水灰比(W/C)或水膠比(W/B)以提昇混凝土強度；但如此則將造成混凝土施工性不佳；而導致施工者(工人)擅自加水以獲得施工性；但這種作法會因水灰比增加而降低了混凝土強度與耐久性。故有良好的混凝土品質管制觀念者，就會考慮使用「摻料」來滿足設計者與施工者之需求，因此在混凝土中使用摻料變成一種必要的手法。這種實際施工與理論相互矛盾的問題，也是近十幾年來混凝土材料科學探討研究的方向。從 1990 年高性能混凝土(HPC)被發展應用後，因為可獲得高強度，並且具有良好的流動性與均勻性，而沒有泌水及析離的問題。摻料應用的

「Know How」，就變成混凝土科技的重要探討研究課題。當然摻料的使用，應符合「混凝土性能需求」及使用「本土化材料」的原則，並滿足混凝土的安全性、工作性、耐久性、經濟性與生態性等五大準則。新的混凝土技術觀念，係以骨材為骨架；而膠結材料則包括水泥漿與摻料。故如何將水泥、水、粗細粒料和摻料，以適當比例組合、產製與施工，做出符合安全性、工作性、耐久性、經濟性與生態性等設計需求的混凝土，不僅是一種「科學與技術」，也是一種「藝術」。

在教授幾年「混凝土技術」課程後，感到坊間書籍，大都為翻譯書或原文書，缺少本土化之混凝土技術書籍，故乃彙整教材講義與指導學生製作之期末報告資料撰寫成書，針對初學者以淺簡的方式來介紹混凝土技術，期對土木營建工程人員在實務工作上及大專學生在修習混凝土技術相關課程上有所助益。本書共分八章，第一章為緒論，介紹混凝土技術之重要性、優缺點與研究發展。第二章為混凝土組成材料與性質，包括膠結材料、粒料骨材、摻料與規範標準之要求。第三章為混凝土水化行為與微觀結構，探討矽酸鹽類之水化行為、鋁酸鹽類之水化行為、水泥漿體微觀結構與成份、水泥漿體中孔隙與體積變化及高性能混凝土水化作用機理。第四章為混凝土配比設計方法，包括混凝土配比設計方法之演變、混凝土配比設計應考量事項、ACI混凝土配比設計方法、高性能混凝土配比設計方法及預拌混凝土之規範標準要求。第五章為混凝土施工技術，包裝混凝土料源品管與產製技術，混凝土輸送、澆置與搗實技術，混凝土養護技術，混凝土表面修飾技術與混凝土品質保證技術。第六章為混凝土性質評估，包括新拌混凝土性質、硬固混凝土性質與相關試驗與規範標準。第七章為混凝土新技術，介紹高性能混凝土、優生高性能混凝土與其他特殊混凝土。第八章為混凝土品質管制，介紹品質管制觀念、隨機抽樣、統計圖、標準差與品質管制圖。第九章為混

凝土未來研究方向，包括 921 大地震 RC 結構物損壞原因與對策、混凝土耐久性、微裂縫、體積穩定性與水化作用模型等等。本書封面之背景圖片，採用國立高雄應用科技大學行政大樓與土木系館之照片，因為此二棟建築物之主要結構材料為混凝土；左上角為新拌高性能混凝土坍落度照片，顯示出優良光澤與工作性；右下角為法國巴黎新凱旋門照片，其主要結構材料亦為高性能混凝土，為一具耐久性與世界性地標考量之建築物。著者期望國內混凝土工程品質，不論新拌或硬固性質均能達到此一優良目標。

本書之完成特別要感謝 黃雄華老師與沈進發老師在土木材料與材料試驗之啟蒙，及黃雄華老師惠賜墨寶於封面提字。更要感謝 黃兆龍教授在混凝土材料之研究方針與治學態度上，悉心教誨始克有成。又系裡同仁潘信雄、林信政、宋明山、高宛睦、黃立政、蕭達鴻、黃文玲、沈茂松、潘煌錕、林棟宏與曾學雄等老師們諸多鼓勵與提供寶貴的建議，在此一併致謝；感謝全華科技圖書公司林淑華小姐的催稿與督促，更要感謝 陳隆景、盧俊文與鍾文豪等三位助理幫忙打字、整理圖表與照片。

混凝土技術為一隨時代進步的學識，其發展可說是日新月異。本書雖經全力以赴且耗費相當長時間才完成，但筆者學識及經驗有限，在催促急切下錯誤必所難免，尚祈各方先進賢達不吝指正賜教，是所至盼。

沈永年、王和源、林仁益、郭文田 謹上
於國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

混凝土是世界上使用最多且最廣泛的土木營建材料，也是一種很特殊的複合材料，係由水泥、水、粗細骨材、摻料等四種以上性質完全不同的材料組成。傳統的觀念，混凝土的膠結材料僅為水泥漿，而骨材則屬填充料，但是混凝土的新觀念，膠結材料應包括水泥漿與摻料，而骨材則視為構(骨)架，故如何將水泥、水、粗細粒料和摻料，以適當比例組合、產製與施工，做出符合安全性、工作性、耐久性、經濟性與生態性等設計性能需求的混凝土，不僅是一種「科學與技術」，也是一種「藝術」。本書適合大專院校土木科系「混凝土技術」及建築科系「混凝土施工」之課程使用，對業界人士而言，更是一本內容豐富的工具書。

同時，若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

目 錄

第 1 章	緒 論	1-1
1-1	混凝土之重要性與性能需求	1-2
1-2	混凝土的優缺點	1-7
1-3	混凝土之研究發展	1-9
第 2 章	混凝土組成材料與性質	2-1
2-1	膠結材料	2-2
2-2	填充材料	2-15
2-3	摻 料	2-48
2-4	混凝土施工規範相關規定	2-59
第 3 章	混凝土水化行為與微觀結構	3-1
3-1	矽酸鈣鹽類的水化作用	3-2
3-2	鋁酸鈣鹽類的水化作用	3-5
3-3	卜特蘭水泥的水化行為	3-8
3-4	水泥漿體微觀結構與成份	3-15
3-5	水泥漿體中孔隙	3-20
3-6	水泥漿體的體積變化	3-23

3-7	高性能混凝土水化作用機理	3-27
-----	--------------------	------

第 4 章 **混凝土配比設計** 4-1

4-1	混凝土配比設計方法之演變	4-2
4-2	混凝土配比設計應考慮事項	4-3
4-3	ACI 混凝土配比設計	4-19
4-4	高性能混凝土配比設計	4-30
4-5	混凝土施工規範配比設計規定	4-37

第 5 章 **混凝土施工技術** 5-1

5-1	混凝土料源品管與產製技術	5-2
5-2	混凝土輸送、澆置與搗實技術	5-10
5-3	混凝土養護技術	5-21
5-4	混凝土表面修飾	5-25
5-5	案例探討分析	5-37

第 6 章 **混凝土性質評估** 6-1

6-1	新拌混凝土性質	6-2
6-2	硬固混凝土性質	6-11
6-3	相關試驗與規範	6-33

第 7 章 **混凝土種類與新技術** 7-1

7-1	HSC、HPC 與 EHPHC	7-2
7-2	流動化混凝土、水中混凝土與結構輕質混凝土	7-6

7-3	纖維混凝土、聚合物混凝土與低密度中強度混凝土	7-8
7-4	其他特殊混凝土	7-12
7-5	實際施工案例	7-23

第 8 章 混凝土品質管制8-1

8-1	品質管制觀念	8-2
8-2	隨機抽樣及資料整理	8-5
8-3	統計圖與標準差	8-15
8-4	常態分佈與品質管制圖	8-27

第 9 章 混凝土未來研究方向9-1

9-1	921 大地震 RC 結構物損壞案例及解決對策	9-2
9-2	混凝土耐久性	9-24
9-3	混凝土水化模型	9-35

緒論

學習目標

- ★ 混凝土之複合材料特性與重要性。
- ★ 混凝土材料五大性質需求。
- ★ 混凝土材料的優缺點。
- ★ 混凝土缺點之改良方法。
- ★ 混凝土科技未來研究發展方向。

⇒ 1-1 混凝土之重要性與性能需求

混凝土(Concrete)是世界上使用最多且最廣泛的土木營建材料，1920 年全世界混凝土年用量為 7 億噸，1997 年全世界混凝土年用量增加為 88 億噸，由於人口增加、經濟繁榮與都市化建設之需求，到 2000 年全世界混凝土年用量已超過 120 億噸[1，9]。

混凝土也是一種很特殊的複合材料，係由水泥、水、粗細骨材、摻料等四種以上性質完全不同的材料所組成，如圖 1-1 所示。水泥(Cement)是一種膠結材料具有水化膠結功能，加水後就立即進行水化作用，能將堅硬的碎石、砂等鬆散固態材料膠結在一起，所形成的人造石材即為混凝土。傳統的觀念，混凝土的膠結材料(Binder)僅為水泥漿(Paste)，而骨材則屬填充料(Filler)。但是混凝土的新觀念，膠結材料則包括水泥漿與摻料，而骨材則視為構(骨)架。故如何將水泥、水、粗細粒料和摻料，以適當比例組合、產製與施工，做出符合安全性、工作性、耐久性、經濟性與生態性等設計性能需求的混凝土，不僅是一種「科學與技術」，也是一種「藝術」。

理論上，混凝土應能符合使用者、設計者與施工者的需求，但事實上往往是相互矛盾的。譬如在強度方面，設計者會要求降低水灰比(W/C)或水膠比(W/B)以提昇混凝土強度；但如此則將造成混凝土施工性不佳；而導致施工者(工人)擅自加水以獲得施工性；但這種作法會因水灰比增加而降低了混凝土強度與耐久性。故有良好的混凝土品質管制觀念者，就會考慮使用「摻料」來滿足設計者與施工者之求，因此在混凝土中使用摻料變成一種必要的手法。這種實際施工與理論相互矛盾的問題，也是 90 年代混凝土材料科學探討研究的方向[2]。從 1990 年高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)被發展應用後，因為可獲得

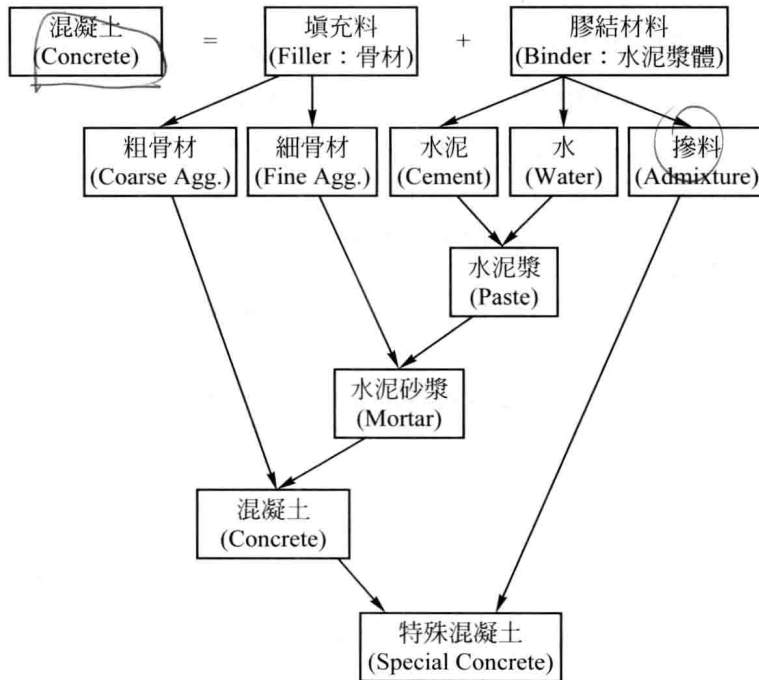


圖 1-1 混凝土組成示意圖

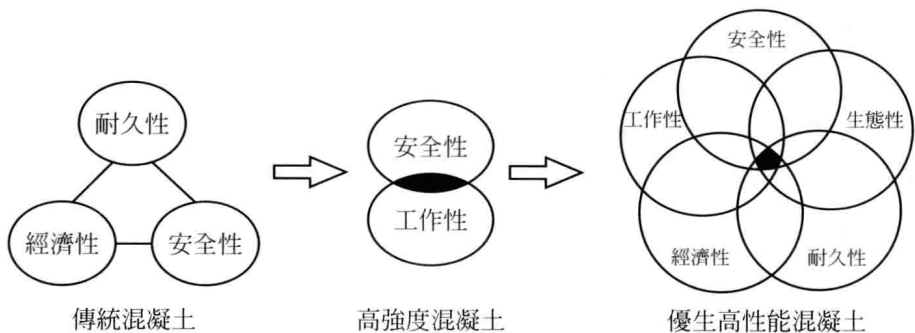


圖 1-2 混凝土五大性能需求[2]

高強度，並且具有良好的流動性與均勻性，而沒有泌水及析離的問題。即瞭解摻料的機理與應用，就成為混凝土科技的重要探討研究課題，見圖 1-2 所示。當然摻料的使用，應符合「結構物目的需求」及「本土化(Local)」的原則，並且滿足安全性、工作性、耐久性、經濟性與生態性等五大性能要求。茲將 21 世紀混凝土的五大性能需求說明如下：

一、安全性(Safety)

混凝土的安全性，一般係指必須符合結構設計所需之抗壓強度要求。新的混凝土配比設計觀念，係以骨材為構架之少漿配比法(即緻密配比法；Densified Mixture Design Algorithm)[3]，而不是如傳統或美國混凝土學會(American Concrete Institute；ACI)配比設計方法，所採用偏向富漿配比的設計法。因為富漿配比混凝土之強度係由漿體來控制；而緻密配比混凝土之強度，則係經由骨材透過應力傳遞而達成，其所需水泥漿(黏結材)量較少；如此可避免水泥漿體乾縮、龜裂的問題發生。傳統混凝土強度設計係依據水灰比(W/C)觀念，而最新混凝土強度設計觀念，則依據水膠比(W/B)或水固比(W/S)來量[4,5]。

二、工作性(Workability)

在考慮混凝土工作性之設計時，若將ACI最低要求坍度標準當作設計坍度，將導致混凝土施工困難，迫使工地工人擅自加水以滿足泵送施工性，如此就造成混凝土品質劣化的後果，譬如蜂窩、強度不足、泌水、析離、白華、表面粉化等缺陷。又應如何才能滿足施工者之工作性需求，這應該是規範制定者、混凝土配比設計者及工程師或建築師等必須面臨的責任與挑戰。台灣處於歐亞大陸版塊之地震頻繁邊緣，即耐震結構物之樑柱接頭鋼筋密佈，若如果仍採用規範或施工說明書的傳統低坍度(100mm)混凝土設計觀念，則拆模後混凝土常會出現因混凝土施工困難搗實作業不佳，而產生蜂窩、品質不佳等問題。進年來日本工程界

已普遍採用高流動化混凝土，以利施工及提昇混凝土品質，因為混凝土若具有良好工作性就能夠均勻地充滿模板內。台灣未來的混凝土將逐漸改採用具流動化的工作性，以獲得良好品質的混凝土。

三、耐久性(Durability)

混凝土的耐久性是不可忽視的，因為混凝土 28 天齡期強度合格，並不一定代表在未來的使用年限(一般為 50 年)內，混凝土都沒有問題。尤其台灣位於潮濕與四面環海的惡劣環境，但設計者常忽略了混凝土耐久性的設計考量，導致混凝土壽命提前結束；或者工程結構物於使用不久後就發生混凝土劣化的嚴重問題，譬如海砂屋或澎湖跨海大橋提前拆除等等，這些問題弊病都與混凝土耐久性欠佳有關。在混凝土耐久性設計考量上，須減少或抑制有損混凝土耐久性的因子，譬如混凝土拌和水量、水泥用量、氫氧化鈣、滲透性等等，並使用較大量骨材與較低漿量以抑制阻止水或不良因子的侵入進出。其他混凝土耐久性的重要策略為譬如提高混凝土水密性、提高混凝土電阻係數、減少混凝土孔隙結構與相關防腐蝕措施等等，都是極重要且有效的方法。

四、經濟性(Economy)

經濟性在混凝土工程上為最重要的需求。對業主而言，其目標是以較低的價格買到最佳的混凝土品質；對營造施工者而言，則希望以最低的施工單價，獲得最高利潤。但獲得混凝土的經濟性，不應該是採用「偷工或減料」或減少水泥用量的方法。而應該是藉由充分發揮混凝土各組成材料的特性，來獲得混凝土的最佳經濟效益，即為「物盡其用」的觀念。以加拿大礦物與能源技術中心(CANMET)之研究成果為例，一公斤水泥可以發揮 100psi 的混凝土抗壓強度；但由國內混凝土的配比資料，則每一公斤水泥僅發揮 10 至 20psi 的抗壓強度，即水泥經濟效益偏低；並且因為水泥用量過多，反而會使混凝土得到「富貴病」而產生龜

裂、收縮等缺陷，如此將不利於混凝土耐久性。在目前國內砂石資源日漸匱乏情形下，如何發揮混凝土各組成材料的特性；設計使用較高抗壓強度的混凝土；及減少混凝土水泥與砂石用量等等策略方法，以獲得混凝土的經濟性需求是很重要的。

五、生態性(Ecology)

在環保意識日漸高漲的情況下，爲了維護地球生存環境，21世紀將會有更多且更嚴格的環保要求規範，ISO 14000 即爲以環保爲訴求的品質保證。如此才可避免地球臭氧層被破壞及大氣溫室效應結果，導致釀成全球性災害發生。在水泥工業中生產 1 噸水泥，同時會釋放產生 1 噸的 CO_2 ，如此是不利全球的溫室效應問題，而全球約有 7 % 的 CO_2 是由水泥工業所產生[8]。並且水泥爲屬於耗能較高的材料，故如何減少混凝土的水泥使用量(在不影響其它性能下)，在環境保護上是很重要的考量策略。而另一混凝土生態性的考量，則是使用工業廢料(譬如矽灰、飛灰、爐石等)的再利用(Recycle)，當然使用飛灰或爐石的出發點，不是爲了減少水泥用量來獲利，其目的應該是爲了提昇混凝土的品質。因爲在水泥生產時，爲了避免空氣污染而回收廢氣中粒子，這些粒子常含有高量的 K_2O 及 Na_2O 等強鹼物質，會促使原屬惰性的骨材被刺激而變爲活潑，而導致發生鹼骨材反應。但這些水泥中的強鹼物質，則是卜作嵐材料的最佳催化劑，有助於促進卜作嵐反應而提昇混凝土品質，即應該正確地使用這些工業廢料，以獲得良好品質的混凝土。又混凝土生態性的另一考量觀點，應該是要研究如何來延長混凝土結構物的使用年限(即耐久性)，使混凝土不易劣化，如此就可減少結構物拆除重建費用，節省地球的資源而有利於生態性。

⇒ 1-2 混凝土的優缺點

混凝土為土木營建工程中使用最為廣泛的材料，因為混凝土具有經濟、耐久、易塑、防火、節能、美觀等優點，如表 1-1 所示。當然混凝土也有缺點，譬如張力強度低、延展性低、強度重量比值低、體積穩定性低、品控性較不易、勞工依賴性較大、易受天候及環境影響等缺點。故工程師應瞭解混凝土的優缺點，才能充分發揮混凝土長處，並改善混凝土缺點，達到混凝土最佳利用的目標。

表 1-1 混凝土優缺點[6]

優點	缺點
經濟性	張力強度低
耐久性	延展性低
易塑性	強度-重量比值低
生態性	低體積穩定性
防火性	品控性較不易
節能性	勞工依賴性大
場塑性	易受天候及環境影響
美觀性	

混凝土可塑造出各種形狀的美觀建築物，譬如台北翡翠水庫、捷運劍潭站的龍舟形站台、八卦山大佛像、高雄東帝士摩天大樓、法國新凱旋門等。又混凝土造價比鋼結構便宜；施工簡易性、節能，故被廣泛使用。品質優良的混凝土是非常耐久的，一般混凝土結構物至少可以使用 50 年以上，譬如總統府、台灣銀行等建築物。至於混凝土的防火性，一般具有 1-2 小時以上的防火時效，比鋼結構安全多了；而鋼材在高溫下會有軟化與應力強度折減現象，易導致結構物產生崩塌破壞，故必須噴塗昂貴的防火被覆材料。又鋼鐵在濕氣環境下的銹蝕問題，亦是不可被忽略的。

就節約能源而言，製造水泥所消耗能源及混凝土施工所需能量，比其他營建材料譬如鋁、鋼鐵、玻璃為低。在考慮到生態及大自然保護的原則下，混凝土具有能資源節約的特點，並且混凝土的水泥用量將來會越來越減少。表 1-2 為典型營建材料耗用能量與相關性質，顯示混凝土之能源消耗為最少。

混凝土必須於工地現場組合模板後，再施以澆置、搗實、養護等施工作業，而不需要特殊的施工技術。在技術上工人僅需稍加訓練即可；若配合高性能混凝土壓送機與高流動化混凝土(坍度大於 230mm，坍流度大於 600mm)，則施工將更為簡易。在建築結構的美學上，混凝土亦有極佳的表現，闢如法國巴黎新凱旋門。

表 1-2 典型營建材料耗用能量及性質[6]

材料	能量需求 (GJ/m ³)	密度 (g/cm ³)	張力強度(壓力強度) (MPa)	彈性模數 (GPa)	熱膨脹係數 10 ⁻⁶ /°C	熱導性係數 W/m · k
混凝土	3.4	2.3	3(35)	~25	10	3
軟鋼	300	7.8	300	21.	12	50
高強度鋼	—	7.8	1000	21.	11	45
純鋁	360	2.8	100	70	23	220
鋁合金	360	2.8	300	70	23	125
玻璃	50	2.5	60	65	6	3
花崗岩石	—	2.6	20(25)	~50	7~9	3
軟木	—	0.35	50	5.5	—	0.2~0.6
硬木	—	0.7	100	10	—	0.2~0.6
聚苯乙烯	—	1	~50	~30	72	0.1